

**Ю. В. Юдин, М. В. Майсурадзе\*, М. С. Карабаналов, А. А. Куклина**

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

\*m.v.maisuradze@urfu.ru

Научный руководитель — проф., д-р техн. наук Ю. В. Юдин

## **СПОСОБ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ БЕЙНИТА ПО ДАННЫМ МЕТОДА EBSD**

На примере перспективной конструкционной стали 25Г2С2Н2МА представлен способ визуализации приповерхностного слоя по данным метода дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD).

*Ключевые слова:* EBSD, бейнит, конструкционная сталь, приповерхностный слой.

**Yu. V. Yudin, M. V. Maisuradze, M. S. Karabanalov, A. A. Kuklina**

## **METHOD FOR VISUALIZATION OF A SURFACE BAINITE LAYER ACCORDING TO EBSD DATA**

The method of visualization of the microstructure of the steel HY-TUF near-surface layer is presented. The method is based on the electron backscatter diffraction (EBSD) data.

*Key words:* EBSD, bainite, structural steel, surface layer.

**И**сследование кристаллографических ориентировок в последнее время получило широкое распространение. Однако некоторые возможности EBSD-анализа в полной мере еще не изучены.

Образцы из стали 25Г2С2Н2МА размером 10x10x5 мм подвергали аустенитизации при температуре 925 °С, в течение 40 мин, затем изотермической закалке в расплаве соли (50 % KNO<sub>3</sub> + 50 % NaNO<sub>3</sub>) при температуре 370, 430 °С в течение 2 ч.

Исследование тонкой структуры бейнита проводилось при помощи электронно-ионного микроскопа Zeiss Auriga Cross Beam с программно-аппаратным комплексом регистрации и анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) Nordlys HKL Channel 5®. Построение трехмерной картины рельефа бейнитной структуры производилось при помощи программного обеспечения Surfer 13.

На ориентационных картах микроструктуры бейнита стали 25Г2С2Н2МА, полученных методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD), видна разноориентированная кристаллографическая структура с ограниченными областями, которые, вероятнее всего, являются бывшими аустенитными зернами (рис. 1, *а*). Размер данных областей составляет 20–40 мкм.

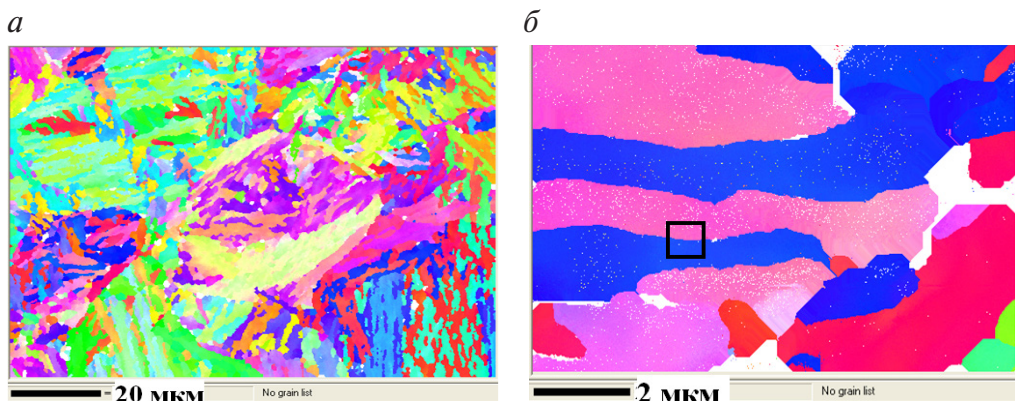


Рис. 1. Ориентационные карты бейнита стали 25Г2С2Н2МА, полученные методом дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) при температуре изотермической выдержки 370 °С, 2 ч:

*а* — ограниченная область с разноориентированной кристаллографической структурой;  
*б* — область с чередующейся кристаллографической структурой

Внутри ограниченных областей (т. е. в пределах одного бывшего зерна аустенита) выявлены зоны с чередующимися кристаллографическими ориентировками, в которых бейнит имеет сложную топологию. Размер бейнитных областей с чередующимися ориентировками составляет от 1,0×1,5 до 10×5 мкм (рис. 1, *б*).

Для построения рельефа приповерхностной зоны при помощи углов Эйлера используется следующий подход. Представим элементарную площадку сканирования электронного микроскопа (рис. 2), для которой известны значения углов Эйлера. На основании этих данных определяются коэффициенты уравнения плоскости данной площадки в координатах, привязанных к электронному микроскопу. Перпендикуляр к плоскости элементарной площадки пересекает виртуальный экран, расположенный на расстоянии  $D_0$  параллельно семейству элементарных площадок размером  $m \times n$  (например, 400×500 нм), в точке с координатами  $x_{1з}$ ,  $y_{1з}$ ,  $D_0$ . При некотором повороте элементарной площадки на виртуальном экране наблюдается отклонение  $Z_0$  от идеального (строго перпендикулярного) отражения, которому соответствует точка с координатами  $x_{2з}$ ,  $y_{2з}$ ,  $D_0$  (пунктирной линией показана элементар-

ная площадка, параллельная виртуальному экрану). Полученное расстояние  $Z_i$  относят к координатам центра элементарной площадки  $x_0, y_0$ . Аналогичным образом происходит оцифровка расстояний  $Z_i$  для всей рассматриваемой площади. Полученные значения координат используются для построения трехмерной картины, визуализирующей поверхностный рельеф исследуемой структуры.

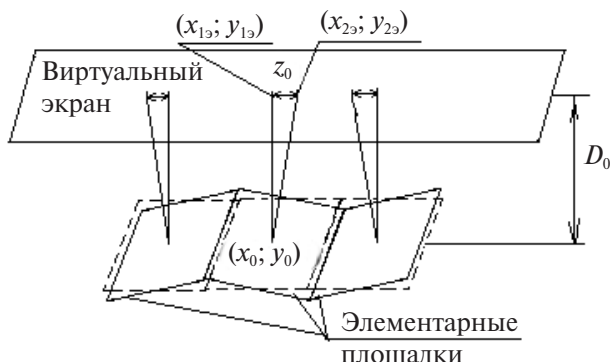


Рис. 2. Схема формирования изображения приповерхностной зоны на основе результатов метода EBSD

В результате использования описанной выше методики было построено трехмерное изображение рельефа приповерхностного слоя бейнитной структуры стали 25Г2С2Н2МА, сформировавшейся в результате изотермического превращения при температуре 370 °С (рис. 3). Как видно, картина представляет собой ряды гребней и впадин, которые характеризуют отдельные пластины бейнита.

При определении истинного расстояния между пластинами бейнита необходимо расстояние между гребнями и впадинами, измеренное на трехмерной картине, увеличить в два раза. Это связано с тем, что при использовании метода визуализации на виртуальном экране формируются идентичные отражения как от впадин на реальной поверхности, так и от вершин.

Построение трехмерной модели рельефа приповерхностного слоя образца стали 25Г2С2Н2МА позволило количественно оценить характерные особенности бейнитной структуры. На рис. 4 приведены интегральные распределения расстояний между гребнями на визуализированной картине рельефа приповерхностного слоя для температур изотермической выдержки 370 и 430 °С. Объем выборки для каждой температуры выдержки составил 100–120 измерений. Наблюдается явная зависимость расстояния между рядами гребней и впадин от темпе-

ратуры изотермической выдержки, причем с уменьшением температуры выдержки от 430 до 370 °С измеренное расстояние уменьшается от 24 до 16 нм.

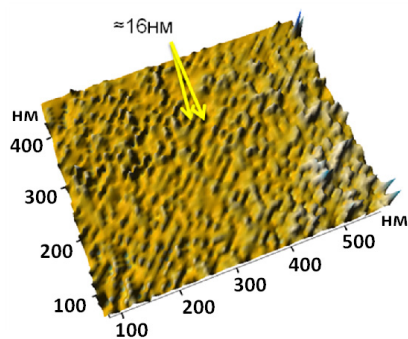


Рис. 3. Рельеф приповерхностного слоя бейнитной структуры стали 25Г2С2Н2МА, сформировавшейся при температуре изотермической выдержки 370 °С

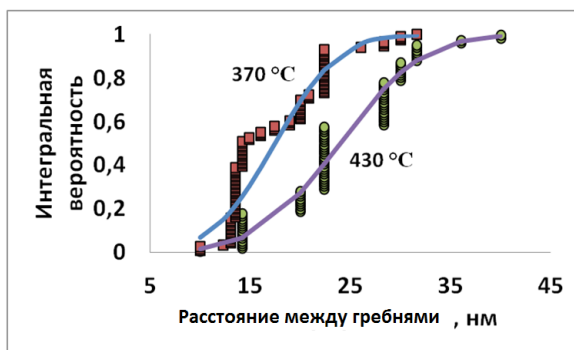


Рис. 4. Интегральное распределение расстояний между гребнями и впадинами для температур изотермической выдержки 370, 430 °С (сплошными линиями показаны расчетные значения для нормального распределения)

Ранее в работе [1] был изучен рельеф бейнитной структуры стали 25Г2С2Н2МА при помощи атомной силовой микроскопии. По результатам данного исследования с понижением температуры изотермической выдержки значение медианной толщины субпластин уменьшается. Для температур изотермической выдержки 370 и 430 °С размер субпластин бейнита по данным атомной силовой микроскопии составил порядка 35 и 45 нм, что весьма близко согласуется с данными, полученными методом EBSD.

Разработана методика наноразмерного исследования приповерхностной зоны образцов с бейнитной структурой, основанная на результатах метода EBSD.

Показано, что толщина субпластин зависит от температуры образования бейнита: с повышением температуры изотермической выдержки размер субпластин возрастает.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Куклина А. А. Исследование бейнитной структуры в стали 25Г2С2Н2МА методом атомной силовой микроскопии // МИТОМ. 2018. № 7. С. 16–20.